气候变化及人类活动背景下石羊河流域生态与水资源变化特征

程 倩[1,2,3]， 齐 月[1]， 刘明春[2,3]， 张 鹏[2,3]， 丁文魁[2,3]，
李兴宇[2,3]， 任丽雯[2,3]， 杨 华[2,3]

（1. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室，中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室，甘肃 兰州 730020； 2. 武威国家气候观象台，甘肃 武威 733000；
3. 甘肃省武威市气象局，甘肃 武威 733000）

摘 要： 本研究基于石羊河流域气象资料、遥感资料以及人文资料，分析流域气候要素和生态环境变化特征，探讨气候变化和人类活动双重作用对流域生态环境的影响。结果表明：近60 a来石羊河流域气温显著升高，增温速率为0.40 ℃·$(10a)^{-1}$，流域气温上升过程中1998年发生突变，通过0.05水平显著性检验；年降水量呈增加趋势，增幅为7.3 mm·$(10a)^{-1}$，年际间差异较大，从空间分布来看，年降水量流域南部向北部递减；干燥度自1961年以来呈减小趋势，由流域北部向南部递减。流域上游西营河出山口九条岭站径流量呈微弱的上升趋势，增加率为0.037×10^8 m^3·$(10a)^{-1}$，主要受降水的影响；自2007年《石羊河流域重点治理规划》实施以来，石羊河流域水资源、植被面积发生较大变化，蔡旗断面过水量、石羊河年平均流量、青土湖及其周边水域和植被面积显著增加，地下水位稳定回升。气候变化和人类活动双重影响下，石羊河流域的生态环境得到有效改善，为流域生态环境保护与建设、水土资源合理利用与保护提供科学依据。

关键词： 气候变化； 人类活动； 生态环境； 水资源； 石羊河流域

生态环境是人类活动的重要物质基础，对人类的生产、生活具有重要意义[1-2]。全球变化过程中气候变暖已经成为一个不争的事实，近几十年来已得到社会各界广泛的关注[3-5]。伴随着社会经济发展步伐加快和气候变暖，西北干旱区内陆河流域人口、资源与生态环境之间的矛盾日益突出，受气候变暖和人类不合理活动影响引起了一系列生态环境问题[6-9]，但这两个驱动因素在不同流域的影响程度各有不同。

石羊河流域位于甘肃河西走廊东段，是中国内陆河流域中人口最密集、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最为严重的流域之一，由于常年水资源缺乏，严重影响了流域内农业安全生产和经济的发展[10-15]。为了遏制石羊河流域生态环境持续恶化的趋势，2007年开始实施的《石羊河流域重点治理规划》（以下简称《规划》）标志着石羊河流域走上了依法改善生态环境、建设节水型社会的道路[16-18]。经过一系列的治理措施，石羊河流域生态环境已经有所改善，下游消亡近51 a的青土湖尾闾湿地在《规划》实施后重现碧波，生态指标已经基本实现。

《规划》实施前，已经开展了有关石羊河流域水资源变化及流域生态环境演变方面的研究，研究发现随着全球气候变暖和人类活动的双重影响，石羊河流域来水量面临着多变性和不确定性，进而引发植被退化、农田次生盐渍化、绿洲萎缩等一系列生态环境问题[19-24]。刘明春等[25]研究发现西营河径流量总体呈减少趋势，汛期雨水是年径流量补给的主

收稿日期： 2023-12-06； **修订日期：** 2024-07-15
基金项目： 国家自然科学基金（42175192）；甘肃省气象局气象科研项目（Zd2021-02）；干旱气象科学研究基金项目（IAM202317）；武威市市列科技计划项目（WW2002007）
作者简介： 程倩（1991-），女，工程师，主要从事农业气象与荒漠生态试验相关研究工作. E-mail: cqwwqxj@163.com
通讯作者： 齐月. E-mail: goodqiyue@163.com

要来源,气温变暖总体不利于流域径流量的增加。《规划》实施以来,张成英等[26]研究发现,石羊河流域中游流量呈略增加趋势,流量变化的主要影响因子是降水、蒸发、最高和最低气温;罗晓玲等[27-28]研究发现,近20 a流域气候暖湿化较显著,气候变化有利于增加流域水资源总量、提高地表植被覆盖率,对沙尘暴有明显的抑制作用,有利于改善生态环境;任丽雯等[29-30]研究发现,石羊河流域植被NPP多年平均值呈不显著增加趋势,植被生态质量指数呈波动上升趋势,近年来流域实施的一系列人工造林、退耕还林还草等措施对植被NPP的增加具有明显促进作用,流域植被生态质量处于改善之中;张雪蕾等[31]研究发现,石羊河流域气候趋向"暖湿化",NPP在"暖湿化"的背景下呈增加趋势。段然等[32]研究发现,石羊河流域径流量总体呈减少趋势,平均每10 a减少0.37×10^{8} m^{3},石羊河流域的9个水文站存在2~10 a、10~30 a的周期变化。综上所述,气候变化和人类活动已经成为影响石羊河流域生态及水资源变化的主要因素。戴君等[33]研究发现,未来不同情景下(2023—2100年),石羊河流域内降水量、气温和潜在蒸散发量均呈显著上升趋势,干燥度指数整体减小,定量研究气候变化和人类活动对生态及水资源的影响,可为区域水资源的科学管理和可持续利用以及生态环境保护提供有价值的参考。因此,本文在深入研究近年来石羊河流域气候要素和环境要素变化特征的基础上,分析气候变化和人类活动双重作用对流域生态环境的影响,为流域生态环境保护与建设、水土资源合理利用与保护和改善生态环境提供指导意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

石羊河流域(101°22′~104°04′E,37°07′~39°27′N)位于甘肃省河西走廊东段、祁连山北麓,总面积约为4.16×10 km^{2}(图1),地处青藏高原北坡,南靠祁连山脉,北邻腾格里和巴丹吉林沙漠,东接黄土高坡西缘。从行政区划上来看,石羊河流域主要有4市9县,即武威市的凉州区、古浪县、民勤县、天祝县的部分地区,金昌市、张掖市和白银市的部分区域。石羊河流域的主要河流有西大河、东大河和黄羊河等共计8条支流,高山的冰雪融水以及降水是这些河流的主要补给来源。由于深居内陆,远离海洋,加上境内地形和海拔高度的影响,长期高温干旱,降水稀少且年际及年代际变化较大,是典型的干旱和半干旱区。乌鞘岭位于甘肃省武威市天祝藏族自治县中部,属祁连山脉北支冷龙岭的东南端,处于石羊河上游区域;凉州区、古浪处于石羊河流域中上游;永昌位于石羊河中游区域;民勤位于石羊河下游区域,是流域内重要的农业生产与人类活动区域,并且对于抵抗沙漠侵蚀具有重要意义。

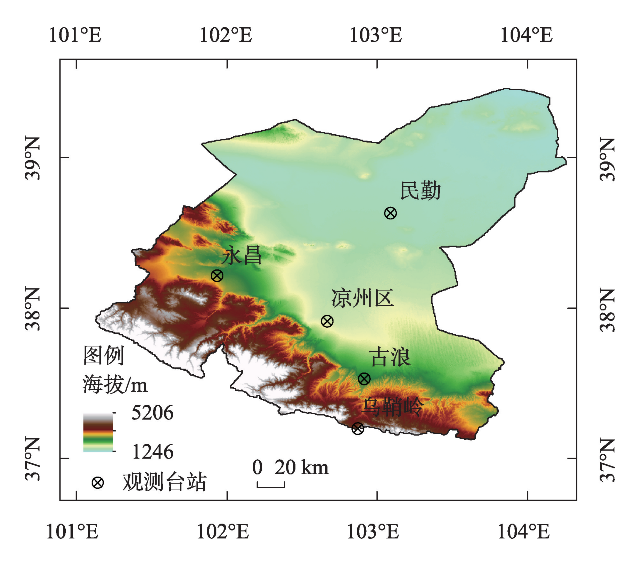


图1 石羊河流域及气象观测站分布示意图

Fig. 1 Locations of weather stations in Shiyang River Basin

1.2 数据来源与处理

所用气象要素数据来源于1961—2020年石羊河流域内民勤、凉州、永昌、古浪、乌鞘岭5个气象站观测资料;1987—2020年机电井数量等人文资料来自于《武威统计年鉴》;2000—2020年NDVI用MODIS卫星资料,空间分辨率1 km;径流量等水资源相关数据通过《甘肃省水资源公报》获得。

1.3 干燥度指数

干燥度指数是表征某个地区干湿程度的指标,而经张宝堃修改的谢良尼诺夫经验公式即积温干燥度公式是针对我国实际情况的,具有很强的实用性,且我国大量的气候资料及有关论著、研究报告大都在张宝堃公式体系下进行的[34],石羊河流域是典型的干旱、半干旱区,降水主要集中在作物生长期,因此本研究计算石羊河流域干燥度采用张宝堃公式:

$$K = 0.16\sum T/P$$

式中：K为干燥度指数；0.16为经验系数；$\sum T$为日平均气温>10 ℃期间的活动积温；P为同期降水量。

1.4 分析方法

利用SPSS 21.0及Excel 2007进行统计分析，利用线性趋势法分析气候要素的年代际变化趋势，气候突变检验采用Mann-Kendall（M-K）检验[35]。

2 结果与分析

2.1 流域气候变化特征

2.1.1 气温 1961—2020年石羊河流域气温平均值为5.7 ℃，变化范围在3.9~7.3 ℃之间，其中2003年最暖为7.3 ℃，近60 a气温年际变化呈显著上升趋势（P<0.001），增温速率为0.40 ℃·$(10a)^{-1}$（图2），高于全国平均增温速率0.26 ℃·$(10a)^{-1}$（1951—2021年），其中流域下游的民勤增温速度最快为0.46 ℃·$(10a)^{-1}$（P<0.001），上游的乌鞘岭增温速度最小为0.29 ℃·$(10a)^{-1}$（P<0.001）。从年代际变化来看，20世纪60年代，各地区气温均呈降低趋势，下游降温最快；70年代流域部分地区为升温趋势，下游的民勤升温最快，中上游古浪、乌鞘岭呈微弱的降温趋势；80年代各地增温显著，凉州区增温速度最慢；90年代仍呈增温趋势，但是与80年代相反，凉州区增温最快。进入21世纪，各地区气温仍呈上升趋势。

对近60 a来石羊河流域气温进行M-K突变检验（图3），各站年平均气温UF曲线变化趋势基本相似，20世纪80年代之前为负值，表明各地区气温呈下降趋势，从80年代中后期开始发生转折，逐渐由负变正，表明80年代中后期开始气温呈增加趋势。各个地区气温突变点不同，民勤出现在1996年，凉州出现在2003年，古浪出现在2000年，永昌出现在1998年，乌鞘岭出现在1997年。石羊河流域年平均气温突变发生在1998年（P<0.001）。石羊河流域显著性增温前（1961—1997年）年平均气温为5.1 ℃，增温速率为0.27 ℃·$(10a)^{-1}$，突变后（1998—2020年）为6.6 ℃，增温速率为0.34 ℃·$(10a)^{-1}$。

2.1.2 降水 1961—2020年石羊河流域历年平均降水量为253.5 mm，年际间差异较大，年降水量最小值为147.4 mm（1962年），最大值为354.7 mm（2019年）。从1961—2020年石羊河流域年降水量变化曲线（图4）可以看出，近60 a来石羊河流域年降水量呈显著增加趋势（P<0.05），增幅为7.3 mm·$(10a)^{-1}$，增幅依次为：乌鞘岭>永昌>凉州>民勤>古浪，其中乌鞘岭增幅最大，为18.5 mm·$(10a)^{-1}$；古浪增幅最小，为2.6 mm·$(10a)^{-1}$。从空间分布来看，年降水量自流域南部向北部递减，即乌鞘岭>古浪>永昌>凉州>民勤。

从年代际变化来看，20世纪60年代，年降水量乌鞘岭呈减少趋势，其他地区呈增加趋势，中游的凉州区降水量增加最明显，增幅达97.5 mm·$(10a)^{-1}$。20世纪70年代，凉州、永昌年降水量呈减少趋势，其他各地区呈增加趋势，古浪增幅最大，为93.2 mm·$(10a)^{-1}$。20世纪80年代，降水量减少的地区多于增加的地区，上游的乌鞘岭减幅最大，为40.4 mm·$(10a)^{-1}$；凉州区、永昌的年降水量均呈增加趋势。20世纪90年代，年降水量增加的地区多于减少的地区，永昌年降水量增幅最大，为36.0 mm·$(10a)^{-1}$；民勤、古浪年降水量呈减少趋势。21世纪10年代，年降水量均呈减少趋势，降幅为凉州[81.1 mm·$(10a)^{-1}$]>古浪>乌

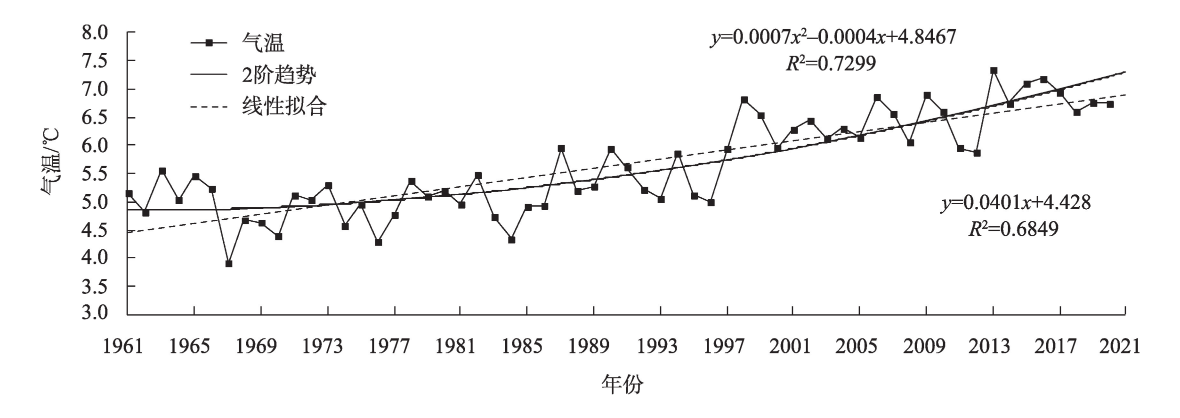


图2 1961—2020年石羊河流域年平均气温变化

Fig. 2 Change of annual mean air temperature in Shiyang River Basin from 1961 to 2020

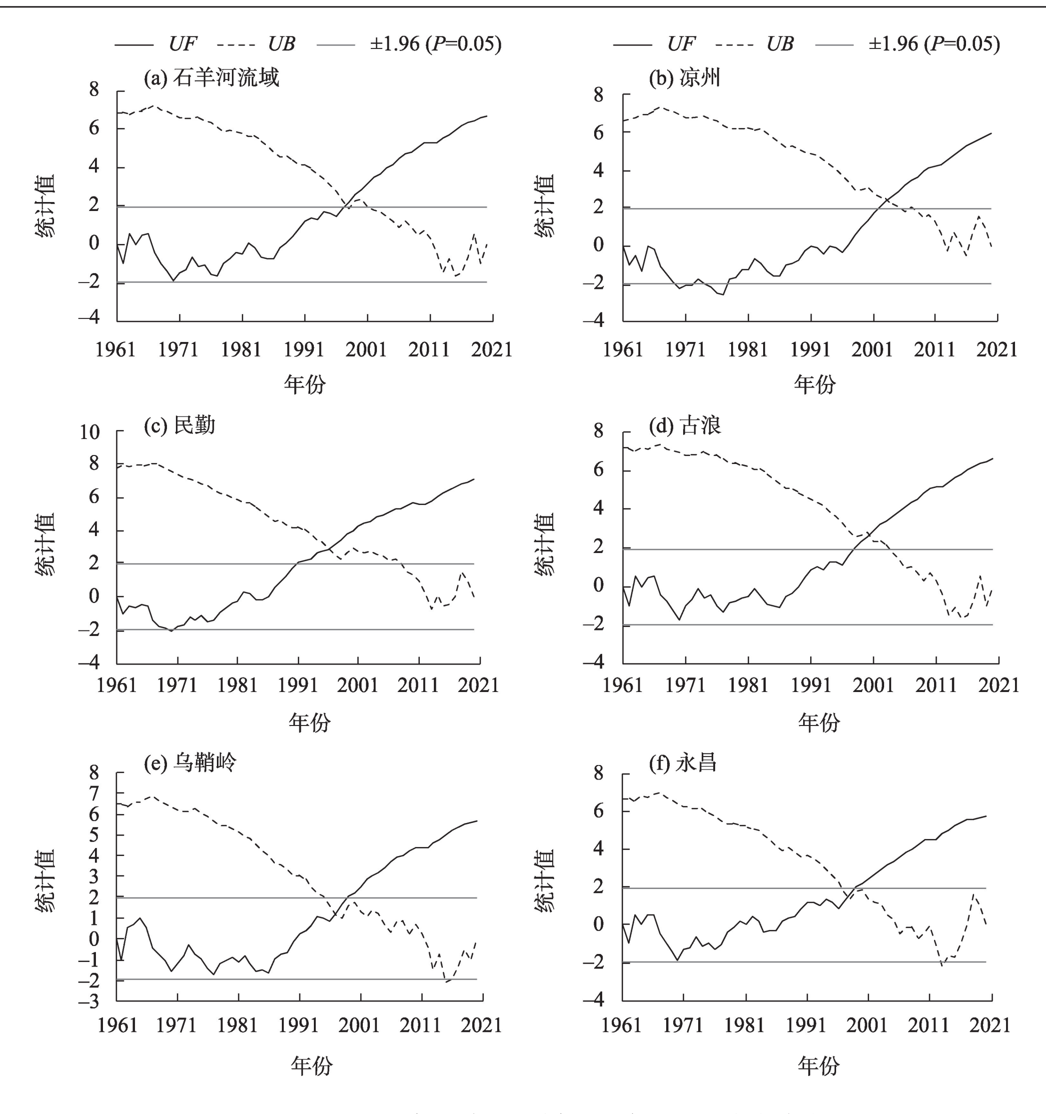


图3 1961—2020年石羊河流域年平均气温M-K突变检验

Fig. 3 M-K mutation test of annual mean air temperature in Shiyang River Basin from 1961 to 2020

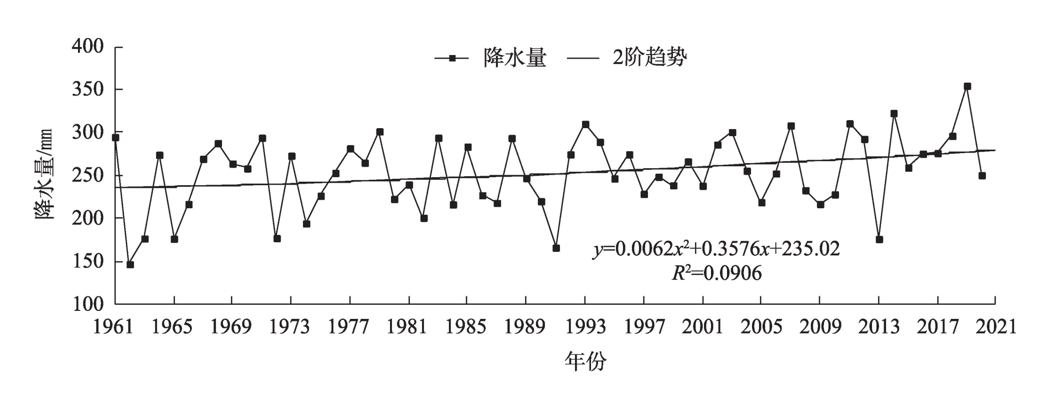


图4 1961—2020年石羊河流域年降水量变化

Fig. 4 Change of annual precipitation in Shiyang River Basin from 1961 to 2020

鞘岭>永昌>民勤[3.4 mm·(10a)$^{-1}$]。21世纪20年代,年降水量增加的地区多于减少的地区,乌鞘岭增加幅度最大,为60.8 mm·(10a)$^{-1}$。

对近60 a来石羊河流域降水量进行M-K检验(图5)可以看出,1961—2020年石羊河流域年降水量的*UF*和*UB*曲线存在多个交点,且交点均位于临界线内,表明1961—2020年石羊河流域年降水量在有交点的年份波动较大,但变化趋势不显著,不存

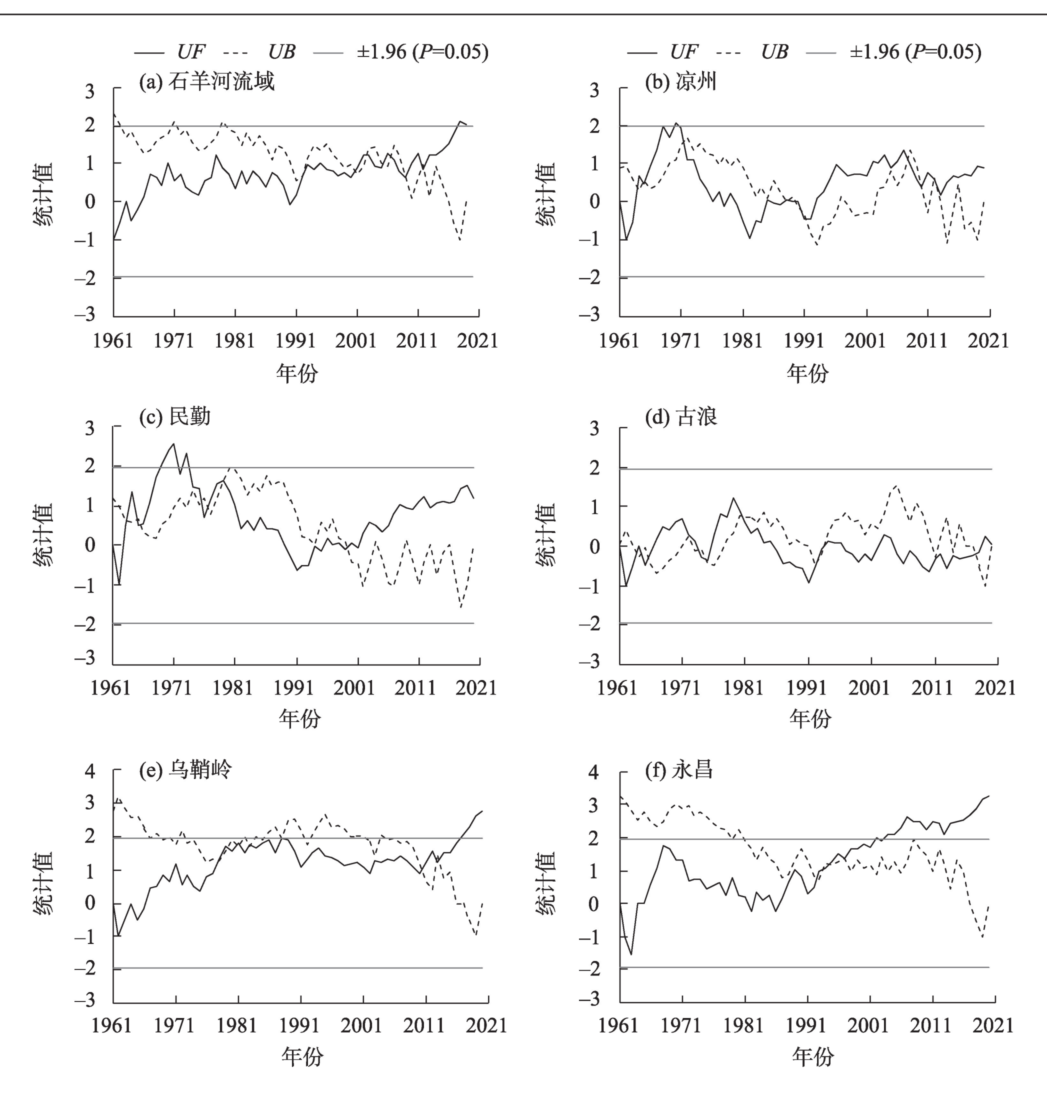


图5 1961—2020年石羊河流域年降水量M-K突变检验

Fig. 5 M-K mutation test of annual precipitation in Shiyang River Basin from 1961 to 2020

在突变现象。

2.1.3 干燥度 1961—2020年石羊河流域干燥度指数均值为3.03，年际间差异较大，其中最大值为8.40（1962年），最小值为1.89（1993年）。近60 a来石羊河流域干燥度呈减小趋势（图6），减幅为0.087·(10a)$^{-1}$。除古浪干燥度指数呈微弱的增加趋势[0.002·(10a)$^{-1}$]外，流域内其他地区干燥度呈减小趋势，减幅在0.06·(10a)$^{-1}$~0.2·(10a)$^{-1}$之间，并且民勤>乌鞘岭>永昌>凉州。从空间分布来看，流域干燥度由北部向南部递减，下游的民勤最大，为6.16；上游的乌鞘岭最小，为1.09。1997年之前，干燥度波动幅度较大，之后逐渐趋于平稳。1961—2020年流域干燥度指数的*UF*和*UB*曲线存在多个交点，表明在有交点的年份波动较大，但变化趋势不显著，不存在突变现象(图7)。

干燥度变化的主要驱动因子是全年>10 ℃的积温和期间的降水量，流域60 a来降水量和气温均表现为增加趋势，且趋势倾向率降水大于气温，二者的综合计算导致气候干燥度指数减小。流域内乌鞘岭平均降水最多，但平均气温最低，平均干燥度最小，为1.09，干燥度<1.00的年份占63%；反之降水量少的区域(民勤)，干燥度大，1993年最小为2.66，其他年份>3.39。

2.2 气候变化及人类活动对石羊河流域生态环境的影响

随着全球气候变暖、水资源短缺及人类活动对环境的影响，石羊河流域气候和生态环境也发生一定的变化，特别是从《规划》实施以来，生态环境发生了巨大变化。气候变化是长时期内气候状态的变化，其变化的原因可以分为自然原因和人为原

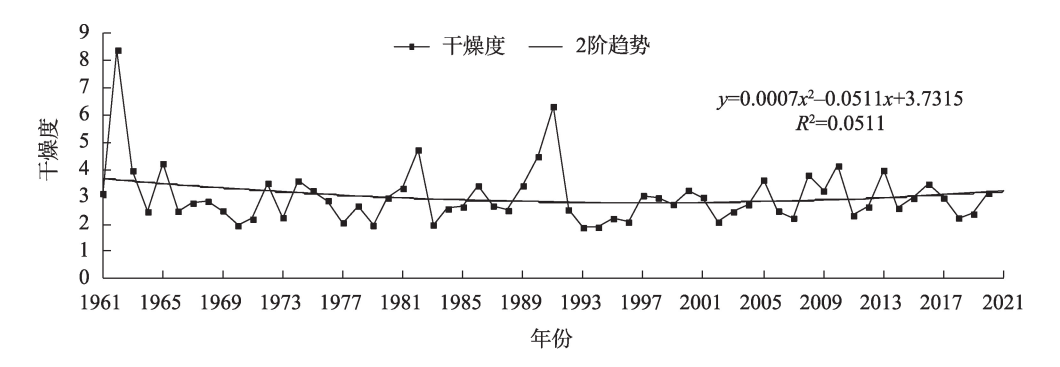


图6 1961—2020年石羊河流域干燥度变化

Fig. 6 Change of dryness index in Shiyang River Basin from 1961 to 2020

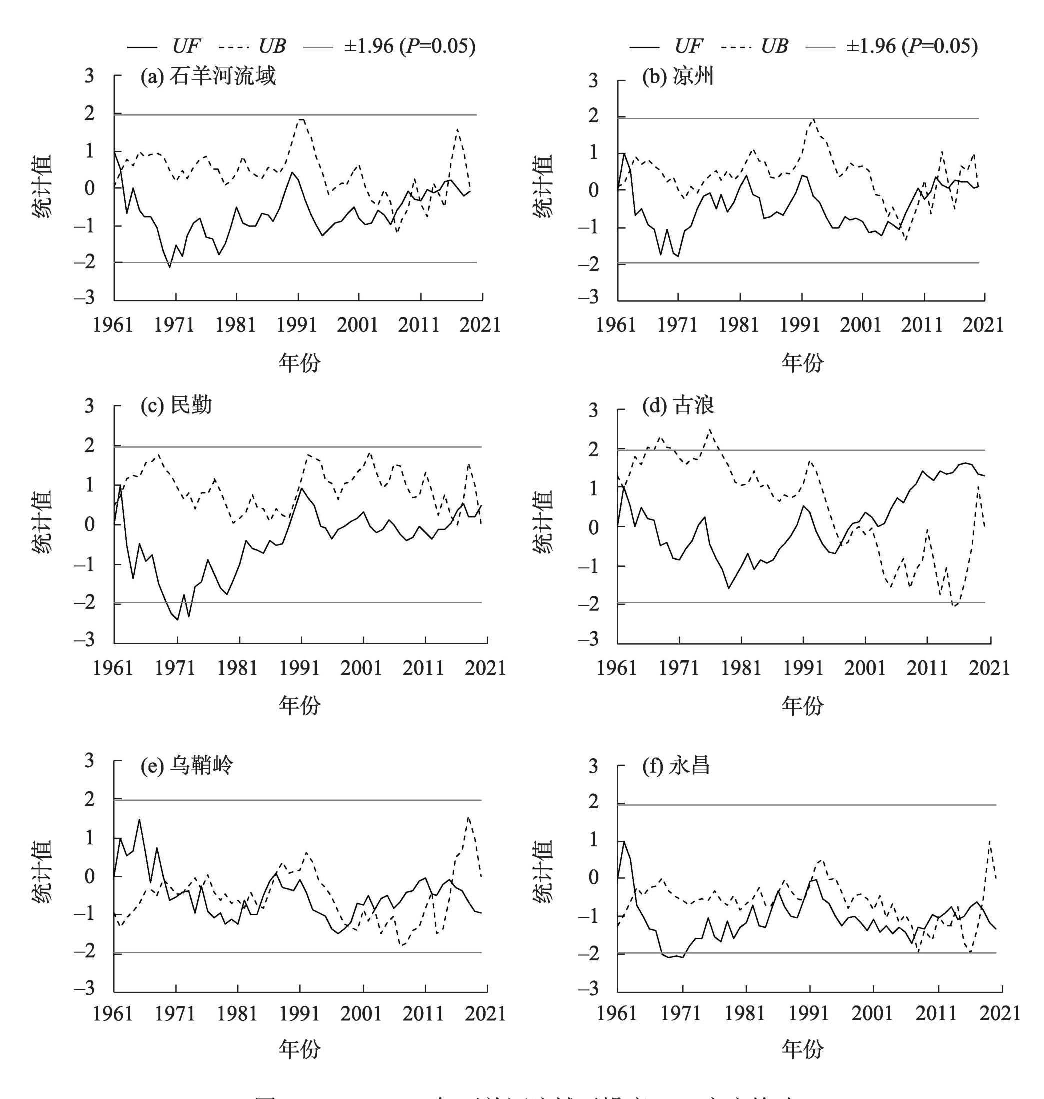


图7 1961—2020年石羊河流域干燥度M-K突变检验

Fig. 7 M-K mutation test of dryness index in Shiyang River Basin from 1961 to 2020

因,故不同区域气候变化不尽相同,通常用气温、降水等气候要素统计量的差异来表示。气候条件作为人类赖以生存的自然环境的一个重要组成部分,对水资源、农业生产、自然生态系统和人体健康均存在直接或间接的影响。石羊河流域有限的水资源主要来源于上游山区,消耗于中下游绿洲区,消耗可通过一些相关措施进行调控,采取措施得当有利则有效改善生态环境,反之会造成生态环境

恶化。

2.2.1 人类活动变化 机电井、耕地面积、保证灌溉面积等变化反映了区域内人类生产活动对气候、水、土地等资源的综合利用程度。民勤县处于全国荒漠化监控和防治的前沿地带,是构建“两屏三带”中“北方防沙带”的重要组成部分,是中国北方防沙带和西北草原荒漠化防治重点区,在整个生态战略布局中显得十分重要。人类活动选用石羊河流域下游的民勤县进行分析研究。

(1) 机电井

民勤县机电井数量变幅较大,2008年之前基本是整体增长的态势,在2008年达到峰值,2007年《规划》实施以来,民勤以大幅关闭机井作为治理主要措施,2008—2010年机井数量明显下降(图8),从9703眼下降至6490眼。

(2) 耕地面积

1987—2017年民勤县耕地面积在5.92×10⁴~6.41×10⁴ hm²之间变化,平均值为6.18×10⁴ hm²,总体呈减小趋势(图9)。其中1987—2005年呈增加趋势,2005年耕地面积最大(6.39×10⁴ hm²)。2007年随着《规划》实施,政府部门大力开展关井压田、退耕还草措施,耕地面积迅速下降,2017年耕地面积最小(5.91×10⁴ hm²)。治理后(2007—2017年)较治理前(2000—2006年)耕地面积减少0.42×10⁴ hm²,减少6.6%。

(3) 保证灌溉面积

1987—2017年民勤县保证灌溉面积在3.77×10⁴~5.50×10⁴ hm²之间变化,平均值为4.58×10⁴ hm²,总体呈增加趋势(图9)。其中1987—2007年保灌面积呈增加趋势,2007年保证灌溉面积达到最大,为5.50×10⁴ hm²,《规划》实施以后,2008年之后呈快速下降趋势。治理后(2008—2017年)较治理前(2000—2007年)减少0.23×10⁴ hm²,减少4.5%。

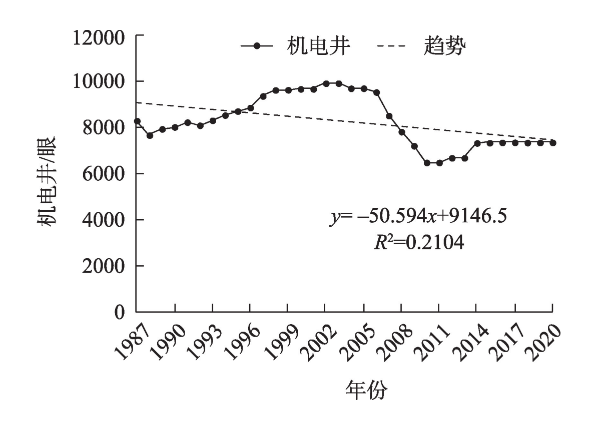


图8 1987—2020年民勤机电井变化

Fig. 8 Changes of electromechanical wells of Minqin from 1987 to 2020

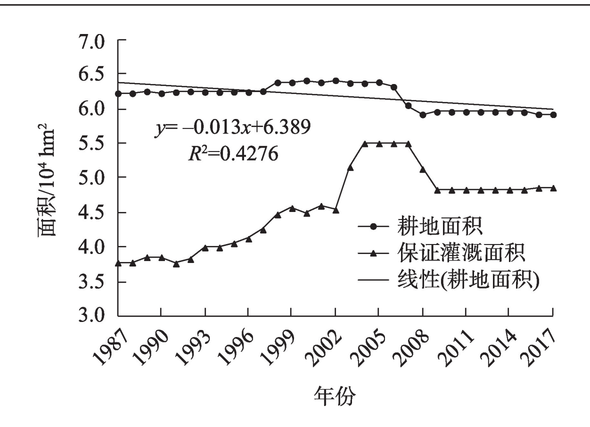


图9 1987—2017年民勤耕地面积和保证灌溉面积变化

Fig. 9 Changes of cultivated land area and guaranteed irrigation area in Minqin from 1987 to 2017

2.2.2 对水资源的影响

(1) 西营河出山口来水量变化

石羊河流域自东向西由8条河流及多条小沟小河组成,河流补给来源为山区大气降水和高山冰雪融水,其来水量与山区气候变化密切相关。西营河是石羊河上游的八大支流之一,在2019年河道管理范围划定中,甘肃省水行政主管部门将西营河确定为石羊河的干流源头,作为西营河的关键控制站,九条岭站是石羊河流域几大河流中唯一一个不受人工设施影响的天然河道监测站。1961—2020年西营河九条岭站年径流量呈微弱的上升趋势,增加率为0.037×10⁸ m³·(10a)⁻¹。分析西营河九条岭站径流与石羊河流域上游乌鞘岭气象站气候因子相关关系见表1,年径流与降水的相关性较好,表明西营河的年径流量主要受降水的影响。从西营河的月径流量与气温、降水量的相关性来看,其中6—10月西营河月径流量与降水的相关性较好;3—4月月径流量与气温相关性较好;5月和11月月径流量与降水、气温的复相关性较好;1—2月、12月月径流量与气温、降水的关系不大,说明主要由地下水渗漏补给。

(2) 下游水环境变化

断面来水量:石羊河蔡旗断面是流入民勤地表径流的唯一通道,20世纪50年代以来,由于水资源利用程度提高、上游用水量增大等,蔡旗断面过水

表1 九条岭站径流与气候因子相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient between runoff and climate factors in Jiutiaoling station

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
降水	0.181	1.141	-0.065	-0.092	0.116	0.337	0.492	0.525	0.411	0.492	0.328	-0.039	0.517
气温	0.189	0.174	0.501	0.451	0.212	-0.109	-0.197	-0.016	0.098	0.107	0.077	0.062	-0.102
气温、降水	0.302	0.214	0.503	0.453	0.269	0.342	0.500	0.532	0.441	0.494	0.359	0.067	0.537

量逐年减少,至2005年仅为$0.61×10^8$ m^3,进而导致民勤绿洲缺水,生态环境恶化。2007年《规划》实施以来,蔡旗断面过水量显著增加,2019年达到$4.01×10^8$ m^3,创1972年以来新高,2010年以来,连续11 a稳定实现石羊河流域重点治理约束性目标。2000—2020年石羊河年平均流量为6.639 $m^3·s^{-1}$,近21 a来呈显著波动增加趋势,年平均流量平均每10 a增加4.368 $m^3·s^{-1}$(图10)。

地下水位:从20世纪60年代开始,石羊河流域下游主要通过打井提取地下水维持农业灌溉,地下水提取量占农灌需水量的89%以上,故选择下游民勤青土湖地下水位以及民勤盆地地下水开采量进行分析。2007年《规划》实施以来,随着上游来水量的增加和下游采取关井压田、缩减地下水的开采等治理措施,地下水位下降趋势逐步得到遏制。从青土湖地下水位埋深的变化趋势来看(图11),多年来石羊河流域下游北部青土湖地下水位呈缓慢回升状态,从2006年的-4.06 m回升到2020年的-2.91 m,地下水位回升了1.15 m,近15 a来青土湖地下水位平均每年回升0.10 m。从民勤盆地地下水位埋深的变化趋势来看,民勤盆地地下水位在稳定回升。2006年来,地下水位埋深从22.35 m回升到2020年的19.89 m,地下水位埋深回升了2.46 m,近15 a来,平均每年回升0.18 m。

青土湖水域面积:根据HJ-1B/CCD卫星遥感资料分析,2010年青土湖重现水域,面积为3.36 km^2,其中连片水体面积约为2.49 km^2,水体沙丘相间面积约为0.87 km^2。2010年之后,水域面积逐年增加,至2020年青土湖水域面积达25.00 km^2,其中连片水体面积约为13.13 km^2,水体沙丘相间面积约为11.87 km^2。自2010年青土湖重现水域以来,水域面积平均每年增加2.76 km^2,其中连片水体面积平均每年增加1.56 km^2,水体沙丘相间面积平均每年增加1.20 km^2。

2.2.3 植被环境变化 2000—2020年石羊河流域归一化植被指数NDVI呈波动增加趋势(图12),每10 a增加0.018,NDVI平均值为0.171,最大值为0.197,出现在2019年;最小值为0.147,出现在2001年。21 a间NDVI值共出现2次较大波动,第1次是2001—2002年间出现较大增长,第2次是2010—2012年间出现较大增长。流域5个县(区)近21 a上游天祝NDVI平均值最大(0.330),下游民勤最小(0.112),近21 a 5个县(区)NDVI平均值均呈微弱波动增加趋势,古浪增长率最大,为0.0034;民勤最小,为0.0018。

根据每年8月HJ-1B/CCD卫星资料分析,青土湖及周边(103°30′~103°45′E,39°2′~39°12′N)植被指数和植被覆盖面积呈增加趋势。2009—2020年近12 a遥感监测青土湖及周边植被覆盖面积来看,2020年最大,为20.75 km^2;2011年最小,为0.3 km^2。

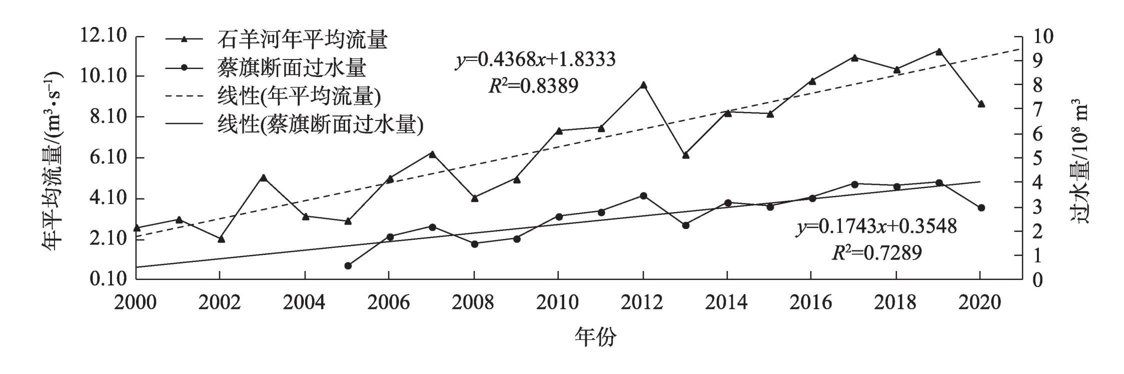


图10 2000—2020年石羊河年平均流量和蔡旗断面过水量的变化

Fig. 10 Changes of annual average flow in Shiyang River and discharge water quantity in Caiqi section from 2000 to 2020

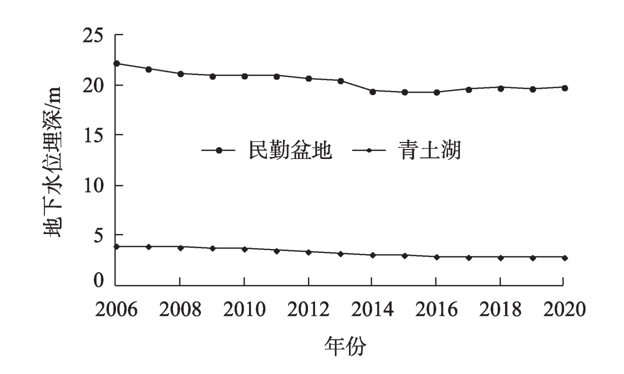


图11 2006—2020年民勤盆地、青土湖地下水位埋深变化

Fig. 11 Change curves of ground water level in Minqin basin and Qingtu Lake from 2006 to 2020

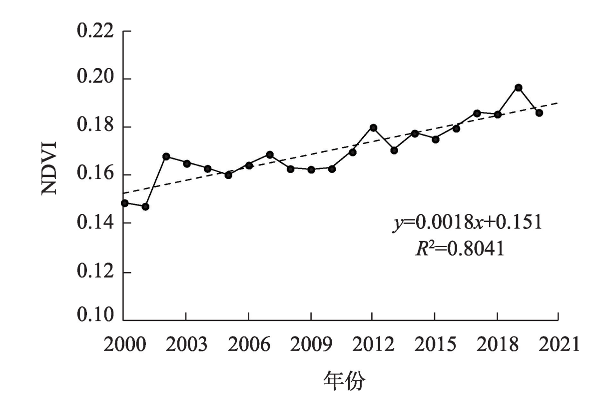


图12 2000—2020年石羊河流域年均NDVI变化

Fig. 12 Change of annual mean NDVI in Shiyang River Basin from 2000 to 2020

近12 a来，青土湖及周边植被覆盖面积平均每年增加2.0 km^2。

利用相关系数法分析石羊河流域植被指数与气温、降水和干燥度的关系（表2）发现，流域植被指数与气温、降水呈显著正相关（$P<0.05$），并且与降水的相关性高于气温。这一结论与罗晓玲[27]、叶培龙[36]等研究结果一致；NDVI与干燥度呈负相关。NDVI与气温间的相关系数分布在0.191~0.427，凉州相关性最大，天祝最小。NDVI与降水量间的相关系数分布在0.190~0.695，永昌、古浪、天祝均呈显著正相关（$P<0.05$）。NDVI与干燥度呈负相关，古浪、天祝通过0.01水平显著性检验。流域植被指数与石羊河年平均流量呈显著正相关（$P<0.05$）。

表2 石羊河流域植被指数与气温、降水、干燥度的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between vegetation index and air temperature, precipitation and dryness index in Shiyang River Basin

要素		永昌	民勤	凉州	古浪	天祝	流域
NDVI	气温	0.306	0.194	0.356	0.277	0.191	0.427**
	降水	0.490**	0.190	0.363	0.465**	0.695*	0.508**
	干燥度	−0.341	−0.094	−0.377	−0.487*	−0.499*	−0.295

注：*、**分别表示通过了0.01、0.05的显著性检验。

3 讨论

本文利用民勤、凉州、永昌、古浪、乌鞘岭等5个气象观测站的气温、降水量等分析了石羊河流域的气候变化特征。结果表明，在气候变暖背景下，石羊河流域气温呈显著升高趋势，降水呈缓慢增加趋势，干燥度指数呈减小趋势，与赵福年等[4,27]的研究结论基本一致。

2000—2007年间，石羊河流域下游的民勤县无论机井数量还是保证灌溉、耕地面积等人文指标均呈现增加态势，2005—2007年出现高峰值，这一时期民勤农业用水量急剧扩大，水资源供需、农业生产、资源环境之间的综合矛盾非常突出；2008—2017年伴随一系列治理措施科学规划，包括“加强用水的总量控制和定额管理、增加进入民勤的地表水量、减少地下水开采、减少上中游灌区和民勤地区的不合理用水量、因地制宜实施生态移民试点、引导农民发展节水高效农业、优化产业结构和用水结构”等提高水资源利用效率、改善流域生态环境和群众生活生产条件的有效措施，以及受到人口数量下降趋势的影响，各方面矛盾均有所缓解，尤其是综合治理后蔡旗断面过水量、民勤青土湖及其周边水域面积显著增加；地下水位明显回升。

通过对西营河九条岭站径流量与气温、降水的相关性分析，发现石羊河上游来水量主要受气候变化的影响，与降水量的相关性高于气温，与徐桂霞等[37-38]的研究结论基本一致。

降水量的增加有利于增加流域上游地上水资源，而人类活动对下游地下水资源影响较大。气候变化与人类活动的综合作用使石羊河流域水资源分配方案更加优化，生态需水不断增加，为下游生态的逐步改善创造了必要条件。

植被是陆地生态系统的重要组成，气候变化和人类活动被认为是影响区域植被变化的主要因素。气候变化是驱动植被变化的内因，而人类活动则是驱动植被变化的外因。以往的研究[31,38-41]认为，

温度和降水量对植被变化具有重要意义,且与植被之间具有高度的空间异质性,植被对气候变化响应也最为敏感,水资源是植物生存的极重要的因子,地下水位的埋深直接影响干旱地区地表植被的生长。通过对石羊河流域植被指数与气温、降水和干燥度的相关关系分析,发现流域内自然降水是影响植被变化的主要因素之一;分析青土湖及周边植被指数及植被覆盖面积,发现通过关井压田、人工压沙等一系列人为因素,自然植被逐渐恢复,生态环境得到有效改善。

本文对石羊河流域气候变化特征的研究采用5个气象站资料分析,站点稀疏,分布不均,覆盖面较窄。因此,笔者将在今后的研究中需要增加更多有代表性的区域站点观测资料,结合石羊河流域地形地貌及人类活动信息,进一步详细分析石羊河流域生态环境对气候变化和人类活动的响应。

4 结 论

(1) 60 a来石羊河流域气温显著升高($P<0.05$),增温速率为0.40 ℃·(10a)$^{-1}$,高于全国平均水平0.26 ℃·(10a)$^{-1}$ (1951—2021年),其中下游增温最快,上游增温速率最小。流域气温在1998年发生突变,突变前增温速率为0.27 ℃·(10a)$^{-1}$,突变后增幅为0.34 ℃·(10a)$^{-1}$。年降水量自1961年以来呈增加趋势($P<0.05$),增幅为7.3 mm·(10a)$^{-1}$,年际间差异较大,最小值为147.4 mm(1962年),最大值为354.7 mm(2019年),从空间分布来看,流域年降水量南部向北部递减,乌鞘岭>古浪>永昌>凉州>民勤。石羊河流域干燥度指数均值为3.03,年际间差异较大,60 a来呈减小趋势,由流域北部向南部递减。

(2) 1961—2020年石羊河流域西营河出山口九条岭站径流量呈微弱的上升趋势,增加率为0.037×10^{8} m^{3}·(10a)$^{-1}$,主要受降水的影响。2000—2020年石羊河年平均流量增加4.368 m^{3}·s^{-1}·(10a)$^{-1}$,青土湖自2010年重现水域以来,水域面积平均增加2.76 km^{2}·a^{-1};青土湖、民勤盆地地下水位呈缓慢回升状态,分别回升0.10 m·a^{-1}、0.18 m·a^{-1}。近21 a来石羊河流域NDVI呈波动增长趋势。遥感监测青土湖及周边植被覆盖面积呈增加趋势。流域植被指数与气温、降水量呈显著正相关,与降水量的相关性高于气温,与干燥度呈负相关。

总之,受气候变化和人类活动的共同影响,石羊河流域水资源发生较大变化,降水的增加有利于增加出山口来水量和地上水资源总量;通过关井压田、退耕还草、提高水资源利用效率等多种措施的实施,石羊河流域蔡旗断面过水量、石羊河年平均流量、青土湖及其周边水域面积明显增加,地下水位稳定回升,自然植被逐渐恢复,说明石羊河流域的生态环境得到改善。

参考文献(References):

[1] 王宇白, 耿佳, 周宇宇, 等. 中国北方地区生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应[J]. 测绘通报, 2022(8): 14−21, 35. [Wang Yubai, Geng Jia, Zhou Yuyu, et al. Spatiotemporal evolution of eco-environment quality and the response to climate change and human activities in northern China[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(8): 14−21, 35.]

[2] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, et al. The trajectory of the anthropocene: The great acceleration[J]. The Anthropocene Review, 2015, 2(1): 81−98.

[3] 张铁鸥, 丑洁明, 董文杰. 中国关于气候变化归因和责任的研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 174−181. [Zhang Yiou, Chou Jieming, Dong Wenjie. Trends and progress on attributions and responsibility of global climate change[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(1): 174−181.]

[4] 赵福年, 王莺, 张龙. 1960—2009年石羊河流域气候变化特征[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(5): 131−140. [Zhao Funian, Wang Ying, Zhang Long. Climate change characteristics from 1960 to 2009 in Shiyang River Basin[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014, 30(5): 131−140.]

[5] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.

[6] 王宝鉴, 宋连春, 张强, 等. 石羊河流域水资源对气候变暖的响应及对生态环境的影响[J]. 地球科学进展, 2007, 22(7): 730−737. [Wang Baojian, Song Lianchun, Zhang Qiang, et al. The response of water resource to climate change and its impact on ecological environment in Shiyang River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(7): 730−737.]

[7] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域近50年来生态环境变化的驱动力分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 262−272. [Hao Xingming, Chen Yaning, Li Weihong. The driving forces of environmental change during the last 50 years in the Tarim River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 262−272.]

[8] 曹文柄, 万力, 曾亦健, 等. 气候变暖对黄河源区生态环境的影响[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 40−47. [Cao Wenbing, Wan Li, Zeng Yijian, et al. Impacts of global warming on the eco-environment in the headwater region of the Yellow River[J]. Earth Science

Frontiers, 2006, 13(1): 40-47.]
[9] 李小琴, 冉宸, 张晓霞, 等. 近60 a石羊河流域蒸发量变化及其原因分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 745-753. [Li Xiaoqin, Ran Chen, Zhang Xiaoxia, et al. Analysis of change and causes of evaporation for the Shiyang River Basin during the past 60 years [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 745-753.]
[10] 黄玉霞, 王宝鉴, 张强, 等. 气候变化和人类活动对石羊河流域水资源影响评价[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 866-872. [Huang Yuxia, Wang Baojian, Zhang Qiang, et al. The impact and assessment of climate change and human activities on the water resources of Shiyang River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(4): 866-872.]
[11] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000—2015年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108-1118. [Li Lili, Wang Dawei, Han Tao. Spatial-temporal dynamics of vegetation coverage and responding to climate change in Shiyang River Basin during 2000-2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38 (5): 1108-1118.]
[12] 冯起, 李宗礼, 高前兆, 等. 石羊河流域民勤绿洲生态需水与生态建设[J]. 地球科学进展, 2012, 27(7): 806-814. [Feng Qi, Li Zongli, Gao Qianzhao, et al. Ecosystem water needs and ecosystem rehalibitation of Minqin oasis in Shiyang River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(7): 806-814.]
[13] 赵明瑞, 彭祥荣, 徐天军, 等. 石羊河流域综合治理以来民勤绿洲生态变化分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(30): 106-111. [Zhao Mingrui, Peng Xiangrong, Xu Tianjun, et al. Ecological changes of Minqin oasis since comprehensive management of the Shiyang River Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(30): 106-111.]
[14] 柴会霞, 安志山, 潘加朋. 石羊河流域水文与水资源特征及其对沙漠化影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1898-1906. [Chai Huixia, An Zhishan, Pan Jiapeng. Characteristics of hydrological and water resources in the Shiyang River Basin and their effects on land desertification[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1898-1906.]
[15] 李梓嫣. 石羊河流域生态流量分析及水资源优化配置研究[D]. 西安: 长安大学, 2020. [Li Ziyan. Study on Ecological Flow Analysis and Optimal Allocation of Water Resources in Shiyang River Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.]
[16] 徐晓宇, 郭萍, 张帆, 等. 政策驱动下石羊河流域生态效应变化分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 185-191. [Xu Xiaoyu, Guo Ping, Zhang Fan, et al. Analysis for changing ecological effects under policy-driven in Shiyang River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 185-191.]
[17] 贾玉婷. 甘肃石羊河流域水资源治理政策研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [Jia Yuting. Study on Water Resources Governance Policy of the Shiyang River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]
[18] 方良斌. 石羊河流域生态治理10年回顾[J]. 甘肃水利水电技术, 2019, 55(8): 14-17. [Fang Liangbin. Review of ecological management in Shiyang River Basin in 10 years[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 55(8): 14-17.]
[19] 马全林, 孙坤, 王继和. 石羊河流域的生态环境问题、引发原因与治理对策[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(5): 64-68. [Ma Quanlin, Sun Kun, Wang Jihe. Environment problem with Shiyang River Basin, its root-causes and rehabilitation measures[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(5): 64-68.]
[20] 沈大军, 崔丽娟, 姜素梅. 石羊河流域水资源问题的制度原因及对策[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 293-299. [Shen Dajun, Cui Lijuan, Jiang Sumei. Institutional causes and countermeasures for water problems in Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 293-299.]
[21] 李小玉, 肖笃宁. 石羊河流域中下游绿洲土地利用变化与水资源动态研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 643-648. [Li Xiaoyu, Xiao Duning. Dynamics of water resources and land use in oases in middle and lower reaches of Shiyang River watershed, Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 643-648.]
[22] 张文化, 魏晓妹, 李彦刚. 气候变化与人类活动对石羊河流域地下水动态变化的影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 183-187. [Zhang Wenhua, Wei Xiaomei, Li Yangang. Groundwater dynamic evolution under climatic change and human activites in Shiyang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16 (1): 183-187.]
[23] 董平国, 冯绍元, 霍再林. 气候变化及人类活动对石羊河下游径流的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010(7): 22-24, 28. [Dong Pingguo, Feng Shaoyuan, Huo Zailin. Effect of climatic changes and human activities on the runoff at down-stream of the Shiyang River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(7): 22-24, 28.]
[24] 韩兰英, 王宝鉴, 张正偲, 等. 基于RS的石羊河流域植被覆盖度动态监测[J]. 草业科学, 2008, 25(2): 11-15. [Han Lanying, Wang Baojian, Zhang Zhengcai, et al. Remote sensing based dynamic monitoring on change of vegetation cover in Shiyanghe River watershed[J]. Pratacultural Science, 2008, 25(2): 11-15.]
[25] 刘明春, 李玲萍, 史志娟, 等. 石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应——以西营河为例[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 193-198. [Liu Mingchun, Li Lingping, Shi Zhijuan, et al. Distribution characteristics of runoff in Shiyang River Basin and its responses to climate change: The case study of Xiying River[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 193-198.]
[26] 张成英, 李玲萍, 卢泰山. 石羊河流域中游流量变化特征及气候影响因素分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(5): 50-53, 56. [Zhang Chengying, Li Lingping, Lu Taishan. Analysis on changing character and climatic factors of the runoff in middle of Shiyang River Basin[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, 11 (5): 50-53, 56.]
[27] 罗晓玲, 丁思聪, 杨梅, 等. 气候变化对石羊河流域生态环境的

影响分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(4): 49-56. [Luo Xiaoling, Ding Sicong, Yang Mei, et al. Impact of climate change on the ecological environment of the Shiyang River Basin[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2022, 16(4): 49-56.]

[28] 罗晓玲, 杨梅, 李岩瑛, 等. 基于NDVI的石羊河流域植被演变特征及其对沙尘暴的影响分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 84-91. [Luo Xiaoling, Yang Mei, Li Yanying, et al. Analysis on characteristics of vegetation evolution and its impact on sandstorm in Shiyang River Basin based on NDVI[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 84-91.]

[29] 任丽雯, 王兴涛, 刘明春, 等. 石羊河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 818-828. [Ren Liwen, Wang Xingtao, Liu Mingchun, et al. Temporal and spatial changes and the driving factors of vegetation NPP in Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 818-828.]

[30] 任丽雯, 王兴涛, 胡正华, 等. 石羊河流域植被生态质量时空变化动态监测[J]. 中国农业气象, 2023, 44(3): 193-205. [Ren Liwen, Wang Xingtao, Hu Zhenghua, et al. Dynamic monitoring on temporal and spatial change of vegetation ecological quality in Shiyang River Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(3): 193-205.]

[31] 张雪蕾, 王义成, 肖伟华, 等. 石羊河流域NPP对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 3110-3118. [Zhang Xuelei, Wang Yicheng, Xiao Weihua, et al. Responses of net primary productivity of natural vegetation to climate change in the Shiyang River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10): 3110-3118.]

[32] 段然, 李宗杰, 王昱, 等. 石羊河流域径流变化特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 57-68. [Duan Ran, Li Zongjie, Wang Yu, et al. Characteristics of runoff change in the Shiyang River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 57-68.]

[33] 戴君, 胡海珠, 毛晓敏, 等. 基于CMIP6多模式预估数据的石羊河流域未来气候变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1547-1562. [Dai Jun, Hu Haizhu, Mao Xiaomin, et al. Future climate change trends in the Shiyang River Basin based on the CMIP6 multi-model estimation data[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1547-1562.]

[34] 郁家成, 吴长春, 黄小燕, 等. 中值温度和干燥度指数计算及其应用的简便方法[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5039-5046. [Yu Jiacheng, Wu Changchun, Huang Xiaoyan, et al. Convenient method of calculation and application of median temperature and aridity index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5039-5046.]

[35] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology(The Second Edition)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]

[36] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 967-979. [Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, et al. Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 967-979.]

[37] 徐桂霞, 郑自宽, 黄维东, 等. 西营河出山口径流变化规律及其影响因素分析[J]. 水利规划与设计, 2022(3): 35-40. [Xu Guixia, Zheng Zikuan, Huang Weidong, et al. Analysis on variation law and influencing factors of outlet diameter flow of Xiyinghe river[J]. Water Resources Planning and Design, 2022(3): 35-40.]

[38] 李玲萍, 刘明春. 石羊河流域出山口河流流量的变化趋势及特性分析[J]. 水土保持学报, 2011, 27(1): 58-63. [Li Lingping, Liu Mingchun. Changing trend and features of the runoff from mountain areas of rivers in Shiyang River Drainage Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 27(1): 58-63.]

[39] Fang J Y ,Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4015-4020.

[40] 刘海, 刘凤, 郑粮. 气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 143-151. [Liu Hai, Liu Feng, Zheng Liang. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 143-151.]

[41] 周训, 吴胜军, 周海燕, 等. 甘肃黑河中下游影响绿洲植被发育的某些因素[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 256-260. [Zhou Xun, Wu Shengjun, Zhou Haiyan, et al. Some factors affecting the development of vegetations in the middle and lower reaches of the Heihe River, Gansu, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1/2) : 256-260.]

Characteristics of ecology and water resource changes in the Shiyang River Basin under the background of climate change and human activities

CHENG Qian[1,2,3], QI Yue[1], LIU Mingchun[2,3], ZHANG Peng[2,3], DING Wenkui[2,3], LI Xingyu[2,3], REN Liwen[2,3], YANG Hua[2,3]

(1. Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reducing of China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Wuwei National Climatological Observatory, Wuwei 733000, Gansu, China; 3. Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei 733000, Gansu, China)

Abstract: This study investigated the characteristics of climate factors and ecological environment changes in the Shiyang River Basin and discusses the impact of climate change and human activities on the ecological environment of the basin based on meteorological data, remote sensing data, and human data of the Shiyang River Basin. Results demonstrated that the air temperature of the Shiyang River Basin significantly increased in the past 60 years, with a warming rate of 0.40 ℃·$(10a)^{-1}$. The abrupt change occurred in 1998, and the significance test of 0.05 level was passed. Annual precipitation exhibited an increasing trend, with an increase of 7.3 mm·$(10a)^{-1}$, and the difference between years was large. From the perspective of spatial distribution, annual precipitation decreased from the south to the north of the basin. Dryness index revealed a decreasing trend since 1961 from the northern basin to the southern decline. The runoff of Jiutiaoling station at the exit of Xiying River in the upper reaches of the basin exhibited a weak upward trend, with an increase rate of 0.037×10^8 m^3·$(10a)^{-1}$, which was primarily affected by precipitation. Since the implementation of the 2007 Shiyang River Basin Management Plan, there have been significant changes in water resources and vegetation areas in this basin, the water discharge of Caiqi section, the average annual flow of the Shiyang River, and the area of the Qingtu Lake and its surrounding waters, wherein the vegetation increased significantly, and the groundwater level increased steadily. Under the dual influence of climate change and human activities, the ecological environment of the Shiyang River Basin has been effectively improved, which provides a scientific basis for the protection and construction of ecological environment and the rational utilization and protection of water and soil resources.

Keywords: climate change; human activities; ecological environment; water resources; Shiyang River Basin